



## Pemodelan dan Simulasi Secara Tunak dan Dinamik pada Pengeringan dengan *Rotary Dryer*

Herry Santoso\*, Viorie Gerrid S., Yogie Saputra Hartono, Aditya Putranto

Jurusan Teknik Kimia, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Katolik Parahyangan  
Jalan Ciumbuleuit 94, Bandung 40141, Telp. (022) 2032655, Fax. (022) 2031110

\*E-mail: [hsantoso@unpar.ac.id](mailto:hsantoso@unpar.ac.id)

### Abstract

*Rotary dryer is one of the dryers that has many uses in chemical, pharmacy, and food industries. The model which represents the actual condition of rotary dryer is needed to make the designing and scaling-up of this dryer easier. The objective of this study is to proposed mathematical model of drying process with rotary dryer in the form of distributed parameter system and then simulate this drying process in its steady state and dynamic condition. The variables that was observed in this model are moisture in the solid feed, moisture in the drying air, temperature of the solid feed, and temperature of the drying air. This non-linear partial differential equations was modified to non-linear ordinary differential equations using finite difference method and then solved using numeric integration technique. The steady state simulation shows that changes in inlet variables have influence to the observed variables on the outlet of rotary dryer with the greatest effect is from the temperature of drying air and the lowest effect is from the temperature of solid feed. Furthermore, the dynamic parameters obtained from dynamic simulation can be used for controlling purpose.*

**Keywords:** distributed parameter system, modelling, rotary dryer, simulation

### Pendahuluan

*Rotary dryer* merupakan salah satu alat pengeringan kontinu yang sangat luas penggunaannya dalam industri-industri kimia, farmasi, makanan, dan makanan ternak. Beberapa aplikasi penggunaan *rotary dryer* dalam industri adalah untuk pengeringan produk-produk olahan kacang kedelai pada industri pengolahan kacang kedelai (Luz dkk., 2010), untuk pengeringan gula setelah proses *washing* dan *centrifugation* pada industri gula (Rastikian dkk., 1999), untuk pengeringan sisa sayuran sebagai makanan ternak (Iguaz dkk., 2003), untuk pengeringan produk-produk farmasi (Mani dan Sokhansanj, 2008), dan untuk pengeringan ammonium nitrat pada industri pupuk (Abbasfard dkk., 2013).

Hingga saat ini, pengeringan pada industri besar masih banyak yang menggunakan *indirect rotary dryer*. Proses pengeringan dengan *indirect rotary dryer* menyebabkan defisiensi perpindahan massa dan energi, serta bervariasinya kualitas dari produk akhir (Luz dkk, 2010). Oleh sebab itu *direct rotary dryer* merupakan salah satu unit pengering yang berpotensi besar penggunaannya dalam industri besar.

Di samping banyaknya penggunaan *rotary dryer*, sistem pada unit pengering ini merupakan sistem kompleks yang melibatkan neraca massa, neraca energi, dan perpindahan massa dan energi. Selain itu sistem ini menghasilkan persamaan-persamaan diferensial parsial non-linier sehingga biasanya desain dan *scale-up* dari *direct rotary dryer* bergantung pada pengalaman (Rastikian dkk., 1999). Oleh sebab itu dibutuhkan model yang cukup akurat sehingga dapat mempermudah desain dan *scale-up* alat pengering ini.

Sebagian besar model pengeringan *rotary dryer* diturunkan dengan pendekatan keadaan tunaknya seperti yang dilakukan oleh Rastikian, dkk (1999) dan Abbasfard, dkk (2013), dan sebagian lagi diturunkan dengan pendekatan keadaan dinamikanya secara *overall* seperti yang dilakukan oleh Luz, dkk (2010) dan Iguaz, dkk (2003). Penurunan model pengeringan *rotary dryer* dengan dua variabel bebas (waktu dan jarak) masih sedikit dilakukan akibat persamaan neracanya yang kompleks, padahal pemodelan dengan dua variabel bebas ini cukup berperan penting dalam hal mendesain sebuah *rotary dryer*.

Model dibuat untuk mewakili kondisi dan kinerja dari unit pengering *direct rotary dryer* dalam *distributed parameter system* sehingga dengan menggunakan model tersebut dapat diprediksi dinamika proses dari unit tersebut secara lebih cepat dan mudah, serta parameter dinamik yang diperoleh dapat digunakan lebih lanjut untuk proses kontrol. Selain itu, model ini juga dibuat untuk mempertimbangkan berbagai variabel yang berpengaruh pada proses pengeringan dalam *rotary dryer* sehingga kinerja dari *rotary dryer* dapat ditingkatkan.

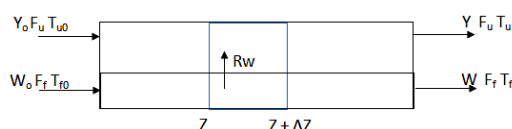


## Metodologi

Pemodelan *rotary dryer* dan metode yang digunakan untuk menyelesaikan model melibatkan persamaan neraca massa, persamaan neraca energi, dan persamaan laju perpindahan massa dan energi untuk umpan yang berupa padatan basah dan udara sebagai gas pengering. Model yang diteliti digunakan untuk memahami dan mempelajari variabel-variabel perpindahan massa dan energi yang terjadi di dalam *rotary dryer* yang dapat mempengaruhi laju pengeringan, serta profil perubahan kandungan air dalam umpan sepanjang *rotary dryer*.

Model matematika yang akan dipakai berupa Persamaan Diferensial Parsial (PDP) non-linier. Model untuk neraca massa dan energi mengikuti model yang diusulkan oleh A. Iguaz, dkk. (2003). Asumsi-asumsi yang digunakan dalam penyelesaian masalah yaitu :

1. Proses pengeringan dilakukan saat periode laju pengeringan menurun.
2. Pengering yang digunakan non-adiabatik sehingga terjadi perpindahan panas ke lingkungan.
3. Aliran massa di dalam pengering adalah aliran sumbat sehingga tidak terjadi perpindahan massa secara aksial.
4. Kapasitas panas ( $C_p$ ) dan densitas ( $\rho$ ) padatan kering merupakan suatu konstanta, bukan fungsi temperatur.
5. Laju massa udara kering dan padatan kering konstan sepanjang pengering.



Gambar 1. Skema Control Volume dari Rotary Dryer

### a. Pembuatan Model

Tahap awal dari penelitian ini adalah tahap pembuatan model. Model dibuat dengan menggunakan neraca massa air dalam padatan umpan, neraca massa air dalam udara pengering, neraca energi padatan umpan, dan neraca energi dalam udara pengering.

Neraca massa air dalam padatan didefinisikan sebagai  $\rightarrow$  |jumlah perubahan massa air dalam padatan selama  $\Delta t$ | = |massa air masuk pada  $z$ | - |massa air keluar pada  $z+\Delta z$ | - |massa air yang menguap dari padatan|

$$M_f|_{t+\Delta t} = M_f|_t + \int_t^{t+\Delta t} F_f W|_z dt - \int_t^{t+\Delta t} F_f W|_{z+\Delta z} dt - R_w M_f \Delta t \quad (1)$$

$$\frac{\partial W}{\partial t} = - \frac{F_f}{\rho_f A \phi} \frac{\partial W}{\partial z} - R_w \quad (2)$$

Neraca massa air dalam udara pengering didefinisikan sebagai  $\rightarrow$  |jumlah perubahan massa air dalam udara pengering selama  $\Delta t$ | = |massa air masuk pada  $z$ | - |massa air keluar pada  $z+\Delta z$ | + |massa air yang menguap dari padatan|

$$G|_{t+\Delta t} = G|_t + \int_t^{t+\Delta t} F_u Y|_z dt - \int_t^{t+\Delta t} F_u Y|_{z+\Delta z} dt + R_w M_f \Delta t \quad (3)$$

$$\frac{\partial Y}{\partial t} = \frac{1}{\rho_u} \left( -Y \frac{\partial \rho_u}{\partial t} - \frac{F_u}{A(1-\phi)} \frac{\partial Y}{\partial z} + \frac{\rho_f \phi R_w}{(1-\phi)} \right) \quad (4)$$

Neraca energi dalam padatan didefinisikan sebagai  $\rightarrow$  |jumlah perubahan entalpi dalam padatan selama  $\Delta t$ | = |entalpi masuk pada  $z$ | - |entalpi keluar pada  $z+\Delta z$ | + |perpindahan panas konvektif dari udara pengering ke padatan| - |panas yang dibutuhkan untuk menguapkan air dan menaikkan temperatur sampai temperatur udara|

$$M_f(H_{cf}|_{t+\Delta t} - H_{cf}|_t) = F_f(H_{cf}|_z - H_{cf}|_{z+\Delta z})\Delta t + U\Delta V(T_u - T_f)\Delta t - R_w M_f (C_{p,uap\ air}(T_u - T_f) + \lambda)\Delta t \quad (5)$$

$$\frac{\partial T_f}{\partial t} = \frac{1}{(C_{p,cf} + C_{p,air} W)} \times \left( -C_{p,air} T_f \frac{\partial W}{\partial t} - \frac{F_f}{A \phi \rho_f} \times \left( (C_{p,f} + C_{p,air} W) \frac{\partial T_f}{\partial z} + C_{p,air} T_f \frac{\partial W}{\partial z} \right) + \frac{U(T_u - T_f)}{\phi \rho_f} - R_w(C_{p,uap\ air}(T_u - T_f) + \lambda) \right) \quad (6)$$

Neraca energi dalam udara pengering didefinisikan sebagai  $\rightarrow$  |jumlah perubahan entalpi dalam udara pengering selama  $\Delta t$ | = |entalpi masuk pada  $z$ | - |entalpi keluar pada  $z+\Delta z$ | - |perpindahan panas konvektif dari udara pengering ke padatan| + |panas yang dibutuhkan untuk menaikkan temperatur air sampai temperatur udara| - |panas hilang ke lingkungan|

$$G(H_{cu}|_{t+\Delta t} - H_{cu}|_t) = F_u(H_{cu}|_z - H_{cu}|_{z+\Delta z})\Delta t - U\Delta V(T_u - T_f)\Delta t + R_w M_f (C_{p,uap\ air}(T_u - T_{ref}))\Delta t - Q_p \quad (7)$$

$$\frac{\partial T_u}{\partial t} = \frac{1}{((C_{p,u} + C_{p,uap\ air} Y) \rho_u - 0.002 C_{p,u} T_u)} \times \left( -\frac{F_u}{A(1-\phi)} \times ((C_{p,u} + C_{p,uap\ air} Y) \frac{\partial T_u}{\partial z}) - \frac{U}{(1-\phi)} \times (T_u - T_f) + R_w \rho_f \frac{\phi}{(1-\phi)} (C_{p,uap\ air}(T_u - T_{ref})) - C_{p,uap\ air} T_u \frac{\rho_f \phi R_w}{(1-\phi)} - \frac{U \pi D (T_u - T_{amb})}{A(1-\phi)} \right) \quad (8)$$

## b. Validasi

Dalam penelitian ini model akan divalidasi dengan menggunakan data literatur dari penelitian yang pernah dilakukan oleh Iguaz, dkk. terhadap pengeringan *rotary dryer*. Data penelitian menggunakan spesifikasi sebagai berikut (Iguaz, dkk. 2003) :

**Tabel 1.** Spesifikasi Data dan Variabel Operasi *Rotary Dryer*

Spesifikasi	Nilai
Panjang <i>rotary dryer</i> (m)	9
Diameter <i>rotary dryer</i> (m)	0,9
Slope <i>rotary dryer</i> (°)	0,63
Kecepatan putar <i>rotary dryer</i> (putaran/menit)	3,3
Laju alir volumetrik udara (m <sup>3</sup> )	1,2
Ukuran rata-rata produk (μm)	10.000
Densitas <i>bulk</i> produk (kg/m <sup>3</sup> )	630

Dalam persamaan model dinamik *rotary dryer* di atas terdapat  $R_w$  yang merupakan konstanta laju pengeringan dan diperoleh dari hasil eksperimen. Konstanta laju pengering dapat dihitung dengan persamaan :

$$R_w = K_w(W - W_e) \quad (9)$$

dengan  $K_w$  merupakan konstanta pengering dan fungsi temperatur udara kering dengan persamaan :

$$K_w = 0,00719 \exp(-130,64/T_u) \quad (10)$$

dan  $W_e$  merupakan kandungan air pada saat setimbang dari padatan kering yang ditentukan dari eksperimen. Model  $W_e$  yang dipakai menurut GAB model (Van Den Berg, 1984) dengan persamaan yang digambarkan oleh López (2000b) sebagai berikut:

$$W_e = \frac{W_m C K_a}{(1-K_a)[1+(C-1)K_a]} \quad (11)$$

dimana  $W_m$ ,  $C$ , dan  $K_a$  adalah parameter-parameter yang merupakan fungsi temperatur udara dengan persamaan :

$$W_m = 0,0014254 \exp(1193,2/T_{u(K)}) \quad (12)$$

$$C = 0,5923841 \exp(1072,5/T_{u(K)}) \quad (13)$$

$$K_a = 1,00779919 \exp(-43,146/T_{u(K)}) \quad (14)$$

dengan  $T_{u(K)}$  merupakan temperatur udara absolut (Kelvin).

Koefisien perpindahan panas dari udara ke padatan dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut (Myklestad, 1963):

$$U = 0,52 \left( \frac{F_u}{A} \right)^{0,8} \quad (15)$$

Kapasitas panas dari padatan umpan dihitung dengan persamaan sebagai berikut (Dominguez, De Elvira, & Fuster, 1974):

$$C_{p,cf} = 1,382 + 2,805 W \quad (16)$$

Kapasitas panas udara lembab dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut (Becker & Isaacson, 1970) :

$$C_{p,cu} = 1 + 1,805 Y \quad (17)$$

Panas laten dari penguapan air pada padatan umpan basah dapat dihitung dengan persamaan Clausius-Clapeyron (Kapsalis, 1987) yaitu:

$$\lambda = L_w (1 + 0,9227771 \exp(-13,4314166 W)) \quad (18)$$

dimana  $L_w$  merupakan kalor laten penguapan air murni yang dinyatakan sebagai:

$$L_w = 2500,6 - 2,364356 T_f \quad (19)$$

*Hold up* merupakan fraksi volum dari volum padatan kering terhadap volum *rotary dryer*. Fraksi ini dapat dihitung dengan persamaan (Friedman & Marshall) :

$$T_r = \frac{0,23 L}{\tan \alpha R^{0,9D}} - \frac{0,6 B L F_u}{F_{f,out}} \quad (20)$$

$$F_{f,out} = \frac{\text{Massa Padatan dalam Rotary Dryer}}{T_r} \quad (21)$$

$$\phi = \frac{\text{Massa Padatan Kering dalam Rotary Dryer} / \rho_f}{\text{Volume Rotary Dryer}} \quad (22)$$

Hubungan densitas udara terhadap temperatur udara (rentang temperatur 65.6 °C <  $T_u$  < 232.2 °C) dapat digambarkan sebagai berikut (Geankoplis, 2003):

$$\rho_u = -0.0020 T_u + 1,1560 \quad (23)$$

### c. Penyelesaian Keadaan Tunak dan Dinamik

Persamaan dalam *rotary dryer* merupakan persamaan diferensial parsial non-linier yang akan diubah menjadi persamaan diferensial biasa dengan metode *finite difference*. Prinsip dari metode *finite difference* adalah dengan mempartisi atau membagi persamaan diferensial dengan memanfaatkan deret Taylor untuk memperoleh batasan partisi yang seragam. Metode ini menggunakan metode penghampiran (maju, terpusat, dan mundur) dimana jumlah partisi yang semakin banyak akan menghasilkan ketelitian yang lebih tinggi. Langkah yang dilakukan dalam metode *finite difference* ini adalah dengan mengubah turunan variabel  $W$ ,  $Y$ ,  $T_f$ , dan  $T_u$  terhadap  $z$  dengan pendekatan:

a. Penghampiran maju

$$\frac{dx}{dz} = \frac{-x_{i+2} + 4x_{i+1} - 3x_i}{2\Delta z} \quad (24)$$

b. Penghampiran mundur

$$\frac{dx}{dz} = \frac{x_{i-2} - 4x_{i-1} + 3x_i}{2\Delta z} \quad (25)$$

c. Penghampiran terpusat

$$\frac{dx}{dz} = \frac{x_{i+1} - x_{i-1}}{2\Delta z} \quad (26)$$

dengan  $x$  merupakan variabel  $W$ ,  $Y$ ,  $T_f$ , atau  $T_u$ .

Persamaan diferensial biasa yang didapatkan (fungsi waktu) kemudian diselesaikan pada keadaan tunak dengan fungsi 'solve' dari perangkat lunak MATLAB, yang berarti semua variabel fungsi waktu bernilai nol. Sedangkan penyelesaian simulasi keadaan dinamik dilakukan dengan cara integrasi numerik dengan fungsi 'ode23s' pada perangkat lunak MATLAB karena sifat persamaannya yang *stiff*. Hasil integrasi numerik diregresi untuk mendapatkan fungsi alih dan parameter dinamik dari proses pengeringan dengan *rotary dryer* ini.

## Hasil dan Pembahasan

### a. Hasil Validasi

Hasil validasi nilai kandungan air pada padatan keluaran dan temperatur udara keluaran *rotary dryer* ditampilkan pada Tabel 3. Dari hasil validasi tersebut didapatkan bahwa nilai variabel-variabel yang divalidasi tersebut, dalam hal ini adalah kandungan air dan temperatur udara pengering keluaran *rotary dryer*, memiliki penyimpangan dari keadaan sebenarnya. Penyimpangan yang cukup besar terjadi pada temperatur keluaran udara pengering yaitu sebesar 7,74% untuk kondisi pertama dan kondisi ketiga. Penyimpangan yang terjadi ini dapat disebabkan oleh *error* akibat penggunaan persamaan empiris bukan akibat pendekatan metode *finite difference* namun kemungkinan besar *error* dari modelnya yang berkontribusi paling besar. Dalam hal ini adalah persamaan empiris untuk kalor penguapan, sehingga mempengaruhi hasil dari simulasi. Selain itu penggunaan persamaan untuk penentuan densitas udara kering sebagai fungsi temperatur yang didekati dengan persamaan linear juga berkontribusi dalam memperbesar penyimpangan ini. Nilai kandungan air dalam padatan keluaran *rotary dryer* sudah cukup baik dengan penyimpangan terbesar terjadi pada kondisi 2 dengan *error* sebesar 3,25%. Penyimpangan ini juga dapat disebabkan oleh penggunaan persamaan empiris untuk menghitung kandungan air pada kondisi kesetimbangan.

Tabel 3. Data Hasil Validasi

No	Variabel Masukan Rotary Dryer			Variabel Keluaran Rotary Dryer					
	$F_0$ (kg padatan kering / detik)	$W_0$ (kg air / kg padatan kering)	$T_{u0}$ (°C)	Kandungan Air dalam Padatan (kg air / kg padatan kering)			Temperatur Udara Pengering (°C)		
				Data Literatur	Hasil Validasi	% error	Data Literatur	Hasil Validasi	% error
1	0,0255	2,43	221	0,2270	0,2207	-2,78	90,10	83,13	-7,74
2	0,0213	2,14	205	0,1540	0,1590	3,25	97,00	100,81	3,93
3	0,0146	3,30	220	0,2700	0,2709	0,33	99,00	106,66	7,74

### b. Simulasi Keadaan Tunak

Tahap simulasi pada kondisi tunak bertujuan untuk mengetahui pengaruh variabel-variabel operasi terhadap kandungan air dalam padatan, kandungan air dalam udara pengering, dan temperatur padatan dan udara pengering pada keluaran *rotary dryer*. Simulasi pada keadaan tunak ini dilakukan dengan menggunakan persamaan yang sama dengan validasi dan kondisi operasi awal berupa kondisi 2 validasi dengan mengubah-ubah nilai variabel masukan yang diamati sebesar  $\pm 20\%$ . Beberapa variabel operasi yang diamati pada penelitian ini adalah laju alir masukan padatan ( $F_0$ ), laju alir masukan udara pengering ( $F_{u0}$ ), kandungan air padatan masukan ( $W_0$ ), temperatur masukan padatan ( $T_{f0}$ ), dan temperatur masukan udara pengering ( $T_{u0}$ ). Hasil simulasi pada keadaan tunak ditampilkan pada Tabel 4.

**Tabel 4.** Pengaruh Perubahan Berbagai Variabel Masukan terhadap Variabel yang Diamati

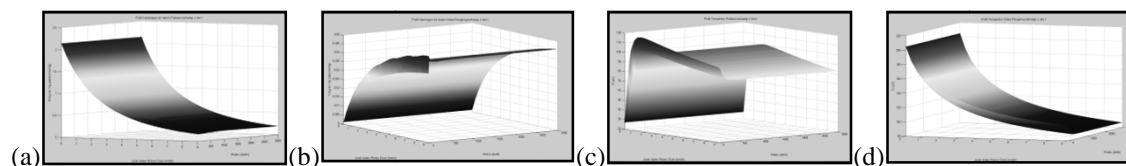
	$W_{out}$	$Y_{out}$	$T_{f,out}$	$T_{u,out}$
$F_{f0}$ dinaikkan	Meningkat	Meningkat	Menurun	Menurun
$F_{u0}$ dinaikkan	Menurun	Menurun	Meningkat	Meningkat
$W_0$ dinaikkan	Meningkat	Meningkat	Menurun	Menurun
$T_{f0}$ dinaikkan	Menurun	Meningkat	Meningkat	Meningkat
$T_{u0}$ dinaikkan	Menurun	Meningkat	Meningkat	Meningkat

Dari hasil simulasi dinamik didapatkan bahwa laju alir masukan padatan, laju alir masukan udara pengering, kandungan air masukan padatan, temperatur masukan padatan, dan temperatur masukan udara pengering memberikan pengaruh terhadap kandungan air dalam padatan ( $W$ ), kandungan air dalam udara pengering ( $Y$ ), temperatur padatan ( $T_f$ ), dan temperatur udara pengering ( $T_u$ ) pada keluaran *rotary dryer*. Pengaruh yang paling besar terhadap keempat variabel keluaran *rotary dryer* adalah dari temperatur masukan udara pengering dan paling kecil adalah dari temperatur masukan padatan dengan deviasi yang sama (20% dari kondisi normal).

### c. Simulasi Keadaan Dinamik

Tahap terakhir yang dilakukan dalam penelitian ini adalah tahap simulasi dinamik. Tahap simulasi dinamik ini dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui kelakuan dinamik dari variabel-variabel yang diamati sepanjang *rotary dryer* jika terjadi penyimpangan pada kondisi masukan *rotary dryer*, mulai dari terjadinya penyimpangan hingga mencapai keadaan tunak yang baru. Kelakuan dinamik dari variabel-variabel proses ini dapat dimanfaatkan untuk mengetahui seberapa cepat dan seberapa besar perubahan yang terjadi jika terjadi penyimpangan pada kondisi masukan *rotary dryer* sehingga data-data dinamik yang diperoleh ini dapat dimanfaatkan lebih lanjut untuk proses kontrol.

Analisa dinamika proses variabel dilakukan dengan menggunakan kondisi operasi yang sama dengan kondisi 2 dari validasi sebagai kondisi operasi normal yang selanjutnya dianalisa pengaruh penyimpangan laju alir padatan masukan, laju alir udara pengering masukan, kandungan air padatan masukan, temperatur padatan masukan, dan temperatur udara pengering masukan *rotary dryer* (+20% dari kondisi normal) terhadap dinamika keempat variabel keluaran *rotary dryer* (kandungan air dalam padatan, kandungan air dalam udara pengering, temperatur padatan, dan temperatur udara pengering). Lama waktu yang digunakan dalam simulasi dinamik ini adalah 3.000 detik karena waktu yang dibutuhkan untuk mencapai keadaan tunak yang baru adalah  $\pm 2.500$  detik. Pengukuran keempat nilai variabel keluaran *rotary dryer* yang paling mudah dilakukan adalah pada keluaran *rotary dryer* sehingga parameter dinamik yang diregresi adalah pada keluaran *rotary dryer* ( $z = 9$  meter) agar dapat dimanfaatkan untuk proses kontrol.



**Gambar 3.** Profil Tiap Waktu dan Sepanjang *Rotary Dryer*: (a) Kandungan Air dalam Padatan, (b) Kandungan Air dalam Udara Pengereng, (c) Temperatur Padatan, (d) Temperatur Udara Pengereng

Profil kandungan air dalam padatan, kandungan air dalam udara pengering, temperatur padatan, dan temperatur udara pengering terhadap waktu dan jarak dalam *rotary dryer* ditampilkan pada Gambar 3. Dari hasil simulasi dinamik diperoleh parameter dinamik kandungan air dalam padatan (Tabel 5).

**Tabel 5.** Perbandingan Parameter Dinamik Kandungan Air Padatan

Pengaruh Kondisi Masukan	Parameter Dinamik				
	$K$ (Gain)	$\tau_1$ (Time Constant 1)	$\tau_2$ (Time Constant 2)	$\tau_L$ (Lead Time)	$\theta$ (Dead Time)
Laju Alir Padatan	7,77	304,64	-	-	197,51
Laju Alir Udara	-0,0806	211,26	-	-	120,91
Kandungan Air Padatan	0,2059	307,19	-	-	620,81
Temperatur Padatan	-0,0004	373,20	-	-	261,67
Temperatur Udara	-0,001849	386,22	-	-	151,76

Dari hasil simulasi tersebut didapatkan ada 5 variabel masukan dan 4 variabel keluaran yang dihubungkan dengan beberapa fungsi alih. Hubungan tersebut dapat dijabarkan dalam bentuk matriks seperti berikut:



$$\begin{bmatrix} W \\ Y \\ T_f \\ T_u \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} & G_{13} & G_{14} & G_{15} \\ G_{21} & G_{22} & G_{23} & G_{24} & G_{25} \\ G_{31} & G_{32} & G_{33} & G_{34} & G_{35} \\ G_{41} & G_{42} & G_{43} & G_{44} & G_{45} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} F_{f0} \\ F_{u0} \\ W_0 \\ T_{f0} \\ T_{u0} \end{bmatrix}$$

Parameter-parameter dinamik yang didapatkan ini dapat digunakan lebih lanjut untuk keperluan kontrol, seperti adanya *lead time* yang besar menunjukkan bahwa terjadinya *overshoot* yang besar, *gain* yang besar menunjukkan perubahan nilai variabel yang besar pula, *time constant* yang menunjukkan seberapa cepat untuk mencapai keadaan tunak yang baru, dan *dead time* yang menunjukkan lamanya variabel untuk mulai merespon. Semua parameter ini diperlukan dalam menentukan variabel mana yang digunakan sebagai penunjuk jika terjadi suatu penyimpangan, misalnya pemilihan berdasarkan *dead time* yang kecil, *gain* yang besar, *time constant* yang kecil, dan *lead time* yang kecil. Selain itu, dapat disimpulkan pula bahwa laju alir udara pengering masukan dapat digunakan sebagai variabel pengontrol karena pengaruhnya yang cukup cepat terhadap keempat variabel keluaran *rotary dryer*.

## Kesimpulan

Penggunaan metode *finite difference* (penghampiran) untuk mengubah persamaan diferensial biasa menjadi persamaan aljabar dengan jumlah diskretisasi 30 memberikan hasil cukup akurat dengan waktu penyelesaian yang tidak terlalu lama. Model yang dibuat cukup akurat dengan *error* terbesar adalah 7,74% untuk temperatur udara keluaran dan 3,25% untuk kandungan air dalam padatan keluaran *rotary dryer*. Kandungan air dalam padatan, kandungan air dalam udara, temperatur padatan, dan temperatur udara keluaran *rotary dryer* dipengaruhi paling besar oleh temperatur udara pengering masukan dan paling kecil oleh temperatur padatan masukan dengan persentase penyimpangan variabel masukan yang sama.

Perubahan kandungan air dalam padatan cenderung stabil jika terjadi penyimpangan kondisi masukan *rotary dryer*. Kandungan air dalam udara mengalami *overshoot* yang cukup besar jika terjadi perubahan laju alir padatan, laju alir udara, temperatur padatan, dan temperatur udara masukan *rotary dryer* yang diindikasikan dengan nilai *lead time* yang lebih besar dibandingkan nilai *time constant*-nya. Perubahan temperatur padatan cenderung mengalami sedikit *overshoot* dan sedikit berosilasi, sedangkan perubahan temperatur udara cenderung stabil jika terjadi penyimpangan variabel masukan *rotary dryer*.

## Daftar Notasi

- A = luas penampang pengering [m<sup>2</sup>]  
B = parameter yang berhubungan dengan waktu tinggal [ $\mu\text{m}^{-0.5}$ ]  
C<sub>p, cf</sub> = kapasitas panas campuran dalam padatan kering [kJ / kg padatan kering . K]  
C<sub>p, cu</sub> = kapasitas panas campuran dalam udara pengering [kJ / kg udara kering . K]  
C<sub>p, f</sub> = kapasitas panas padatan kering [kJ / kg padatan kering . K]  
C<sub>p, u</sub> = kapasitas panas udara kering [kJ / kg udara kering . K]  
C<sub>p, air</sub> = kapasitas panas air dalam wujud cair [kJ / kg air . K]  
C<sub>p, uap air</sub> = kapasitas panas air dalam wujud uap [kJ / kg uap air . K]  
D = diameter *rotary dryer* [m]  
dp = diameter partikel padatan kering rata-rata [m]  
F<sub>u</sub> = laju massa udara kering [kg udara kering / detik]  
F<sub>f</sub> = laju massa padatan kering [kg padatan kering / detik]  
G = massa udara dalam *control volume rotary dryer* [kg udara kering]  
H<sub>cf</sub> = entalpi campuran dalam bahan umpan [kJ / kg padatan kering]  
H<sub>cu</sub> = entalpi campuran dalam udara pengering [kJ / kg udara kering]  
K = *gain*  
L = panjang *rotary dryer* [m]  
L<sub>w</sub> = panas laten penguapan air murni sebagai fungsi T<sub>f</sub> [kJ / kg]  
M<sub>f</sub> = massa padatan kering dalam *control volume rotary dryer* [kg padatan kering]  
Q<sub>p</sub> = hilang panas ke lingkungan [kJ / detik]  
R = kecepatan putar *rotary dryer* [putaran / menit]  
R<sub>w</sub> = laju pengeringan [=] kg air / kg padatan kering . detik  
s = *slope rotary dryer*  
T<sub>amb</sub> = temperatur *ambient* [°C]  
T<sub>u</sub> = temperatur udara kering [°C]  
T<sub>f</sub> = temperatur padatan kering [°C]  
Tr = waktu tinggal [detik]



$T_{ref}$	= temperatur referensi [ $^{\circ}\text{C}$ ]
$U$	= koefisien perpindahan panas konveksi [ $\text{kJ}/\text{m}^2 \cdot \text{detik} \cdot \text{K}$ ]
$U_p$	= koefisien perpindahan panas ke lingkungan [ $\text{kJ}/\text{m}^2 \cdot \text{detik} \cdot \text{K}$ ]
$W$	= kandungan air dalam padatan kering [ $\text{kg air} / \text{kg padatan kering}$ ]
$Y$	= kandungan air dalam udara [ $\text{kg uap air} / \text{kg udara kering}$ ]
$z$	= jarak <i>control volume</i> dalam <i>rotary dryer</i> [ $\text{m}$ ]

#### Notasi Huruf Yunani

$\alpha$	= <i>slope rotary dryer</i> [derajat]
$\tau$	= <i>time constant</i>
$\lambda$	= panas laten penguapan air pada padatan kering [ $\text{kJ} / \text{kg}$ ]
$\lambda_0$	= panas laten penguapan air murni pada $T_{ref}$ ( $0^{\circ}\text{C}$ ) [ $\text{kJ} / \text{kg}$ ]
$\rho_u$	= densitas udara kering [ $\text{kg udara kering} / \text{volum udara}$ ]
$\rho_f$	= densitas padatan kering [ $\text{kg padatan kering} / \text{volum umpan padatan}$ ]
$\emptyset$	= <i>hold up</i> [volume padatan kering / volum <i>rotary dryer</i> ]
$\theta$	= <i>dead time</i>

#### Daftar Pustaka

- Abbasfard, H., Hasan H.R., Sattar G., and Mehdi G. 2013. *Mathematical modeling and simulation of an industrial rotary dryer : A case study of ammonium nitrate plant*. Journal of Powder Technology.
- Becker, H. A., & Isaacson, R. A. 1970. *Wheat drying in well stirred batch and continuous-moving-bed dryers*. Canadian Journal of Chemical Engineering, 48, 560–567.
- Domínguez, M., De Elvira, C., & Fuster, C. 1974. *Influence of air velocity and temperature on the two stages cooling of perishable large-sized products*. Bulletin of the International Institute of Refrigeration, 3, 83–90.
- Douglas, P. L., Kwade, A., Lee, P. L., & Mallick, S. K. 1993. *Simulation of a rotary dryer for sugar crystalline*. Drying Technology, 11(1), 129–155.
- Friedman, S. J., & Marshall, W. R., Jr. 1949. *Studies in rotary drying. Part I: Holdup and dusting*. Chemical Engineering Progress, 45(8), 482–493.
- Geankoplis, C.J. 2003. *Transport Processes and Separation Process Principles (includes unit operations, 4<sup>th</sup> ed.)*. Pearson Education, Inc.
- Iguaz, A., A. Esnoz, G. Martinez, A. López, P. Vírveda. 2003. *Mathematical modeling and simulation for the drying process of vegetable wholesale by-products in a rotary dryer*. Journal of Food Engineering, 59, 151–160.
- Kapsalis, J. G. 1987. Influence of hysteresis and temperature on sorption isotherms. In L. B. Rockland, & L. R. Beuchat (Eds.), *Water activity: theory and applications to food* (pp. 173–213). New York: Marcel Dekker.
- López, A., Iguaz, A., Esnoz, A., & Vírveda, P. 2000a. *Thin-layer behaviour of vegetable wastes from wholesale market*. Drying Technology, 18(4&5), 985–994.
- López, A., Iguaz, A., Esnoz, A., & Vírveda, P. 2000b. *Modelling of sorption isotherms of dried vegetable wastes from wholesale market*. Drying Technology, 18(4&5), 995–1006.
- Luz, Gianini Regina, Wagner André dos Santos Conceição, Luiz Mário de Matos Jorge, Paulo Roberto Paraíso, Cid Marcos Gonçalves Andrade, 2010. *Dynamic modeling and control of soybean meal drying in a direct rotary dryer*. Journal of Food and Bioproducts Processing.
- Myklestad, O. 1963. *Heat and mass transfer in rotary dryers*. Chemical Engineering Progress Symposium Series, 59(41), 129–137.
- Rastikian, K.; Capart, R.; Benchimol, J. 1999. *Modelling of sugar drying in a countercurrent cascading rotary dryer from stationary profiles temperature and moisture*. Journal of Food Engineering, 41, 193–201.
- Van Der Berg, C. 1984. Description of water activity of foods for engineering purposes by means of the G.A.B. model of sorption. In B. M. McKenna (Ed.), *Engineering and foods: Vol. 1* p. 311). New York: Elsevier Applied Science.
- YLINIEMI, L. (1999). *Advanced Control of a Rotary Dryer*. Department of Process Engineering. Oulu, Finland, University of Oulu.





## Lembar Tanya Jawab

**Moderator : IGS Budiaman (UPN "Veteran" Yogyakarta)**

**Notulen : Putri Restu Dewati (UPN "Veteran" Yogyakarta)**

1. Penanya : Hendriyana (UNJANI)  
Pertanyaan :
  - Pada penelitian ini yang dikeringkan apa?
  - Variabel yang digunakan apa?Jawaban :
  - Pada penelitian ini yang dikeringkan adalah *vegetable waste*, dengan kadar 2,43 kg air/kg padatan kering
  - Variabel yang diteliti adalah kandungan air di padatan dan temperatur udara pengering.
2. Penanya : IGS Budiaman (UPN "Veteran" Yogyakarta)  
Pertanyaan : Berapa besarnya sudut kemiringan *rotary dryer*?  
Jawaban : Besarnya sudut kemiringan *rotary dryer*  $0,63^{\circ}$